

УДК 621.791.72

Е. С. Саломатова, Д. Н. Трушников, Т. В. Ольшанская, В. Я. Бельский,
И. В. Ситников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь

ВЛИЯНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА НА ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

В статье описана математическая модель процессов испарения, позволяющая изучить влияние осцилляции электронного луча на изменение химического состава сварного шва и спрогнозировать конечный химический состав сварных соединений при электронно-лучевой сварке сплавов, содержащих легкоиспаряемые легирующие элементы.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, осцилляция электронного луча, легкоиспаряемые компоненты, прогнозирование химического состава сварных соединений.

E. S. Salomatova, D. N. Trushnikov, T. V. Ol'shanskay, V. Y. Belenkiy, I. V. Sitnikov

INFLUENCE OF THE OSCILLATIONS OF THE ELECTRON BEAM CHANGES THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE WELDED JOINTS IN ELECTRON BEAM WELDING

The paper describes a mathematical model of the processes of evaporation, which allows to study the influence of the oscillations of the electron beam on the chemical composition of the weld and to predict the final chemical composition of the welded joints in electron beam welding of alloys containing volatile alloying elements.

Keywords: electron-beam welding, electron beam oscillation, volatile components, predicting the chemical composition of the welded joints.

В последнее время при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) применяется ряд технологических приемов, обеспечивающих улучшенное формирование сварного шва. К ним относится динамическое воздействие на электронный луч (ЭЛ) при сварке, которое может осуществляться путем осцилляции ЭЛ с использованием различных траекторий. Применение указанного технологического приема способствуют получению сварных соединений с отсутствием специфических дефектов ЭЛС, таких как пикообразование

(колебания глубины сварного шва в продольном сечении) и несплавлений в корневой части сварного шва, формированию однородной структуры сварных швов при сварке разнородных материалов, средне- и высоколегированных сталей, а также устранению пористости сварного шва при ЭЛС цветных металлов и сплавов.

Физические процессы в парогазовом канале, формирующемся в металле при ЭЛС с осцилляцией ЭЛ, до настоящего времени являются малоизученными. При этом одним из важнейших процессов, протекающих при ЭЛС материалов, содержащих легкоиспаряемые легирующие элементы, является процесс испарения. Доказано, что процессы испарения при ЭЛС оказывают влияние на формирование парогазового канала, и при интенсивном испарении легкоиспаряемых компонентов может уменьшаться глубина проплавления, что приведет к изменению геометрических характеристик сварных соединений. Также эти процессы могут оказывать влияние на конечный химический состав и, следовательно, на эксплуатационные характеристики сварных соединений.

На протяжении многих лет ведутся попытки математически описать процессы, протекающие в парогазовом канале при ЭЛС с глубоким проплавлением. Существуют адекватные математические модели, описывающие физические процессы в парогазовом канале, но все они применимы либо к ЭЛС статическим ЭЛ, либо к лазерной сварке с периодическим воздействием на лазерный луч. До настоящего времени в литературе практически отсутствуют данные о процессах испарения и истощения сплавов легкоиспаряемыми легирующими элементами при ЭЛС с осцилляцией ЭЛ. Восполнение этого пробела является актуальной научной задачей, имеющей важное фундаментальное и прикладное значение.

Целью данной работы является изучение влияния осцилляции ЭЛ на изменение химического состава сварного шва и прогнозирование конечного химического состава сварных швов при ЭЛС сплавов, содержащих легкоиспаряемые легирующие элементы.

Постановка задачи. Определяющее уравнение и краевые условия. При построении модели были приняты следующие предположения: форма парогазового канала аппроксимируется цилиндром; поверхность парогазового канала считается изотермической; перенос тепла и массы вещества вдоль оси канала считается несущественным; коэффициент диффузии в расплаве зависит от температуры расплава; истощение легирующими элементами в расплаве происходит в тонком слое у поверхности парогазового канала; из-за высокого давления скорость паров металла на выходе из парогазового канала равна местной скорости звука. Таким образом, задача сводится к двумерной, а расчетная область содержит только жидкую фазу. Для решения задачи был использован численный метод, позволяющий учесть процессы испарения, конденсации и диффузии элементов в расплаве. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Система уравнений, описывающая процессы испарения при ЭЛС, включает:

– уравнение переноса импульса (уравнение Навье – Стокса):

$$(\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{U}, \quad (1)$$

– уравнение переноса энергии:

$$\rho c_p \vec{U} \cdot \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T), \quad (2)$$

– уравнение переноса примеси:

$$\vec{U} \cdot \nabla S = D(\nabla^2 S), \quad (3)$$

где \vec{U} – поле скоростей расплава; P – давление; ρ – плотность; ν – коэффициент кинематической вязкости; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; λ – коэффициент теплопроводности; S – концентрация i -го компонента в расплаве; T – температура на стенках парогазового канала; D – коэффициент диффузии i -го элемента расплава; $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ – оператор Лапласа; индекс i – здесь и далее опущен.

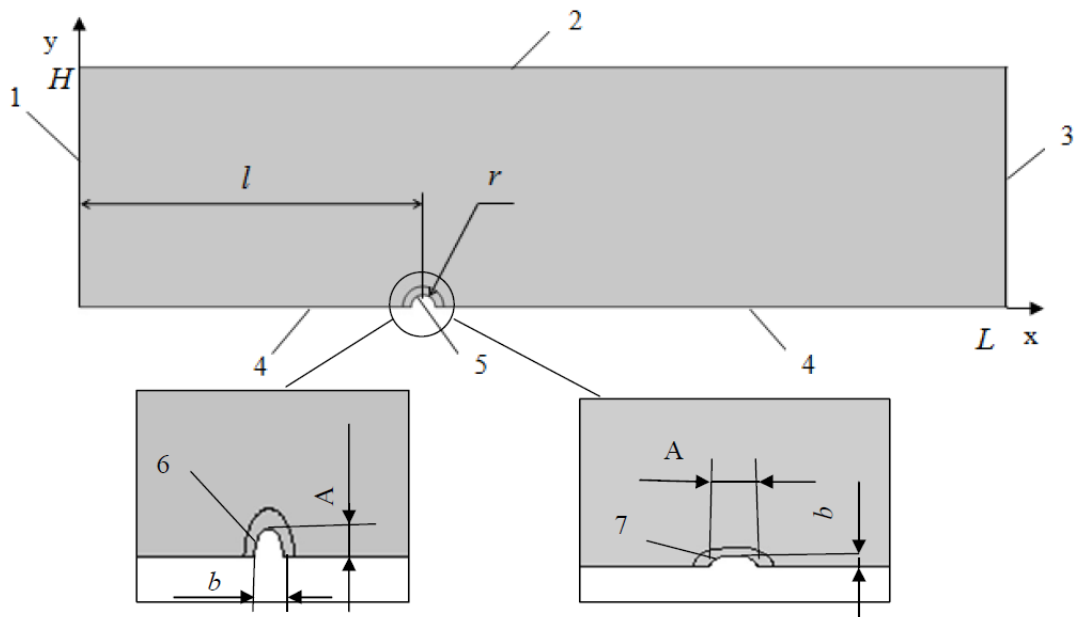


Рис. 1. Расчетная схема. 1 – входная граница; 2 – боковая граница; 3 – выходная граница; 4 – ось симметрии; 5 – парогазовый канал, образованный статическим лучом; 6 – парогазовый канал, образованный электронным лучом с поперечной осцилляцией; 7 – парогазовый канал, образованный электронным лучом с продольной осцилляцией; r – радиус парогазового канала; a – большая полуось эллипса; b – малая полуось эллипса

Зависимость коэффициента диффузии от температуры принята, экспоненциальной:

$$D = D_0 \exp(Q/8,31 \cdot T), \quad (4)$$

где D_0 – амплитудное значение диффузии i -го элемента расплава; Q – энергия активации i -го компонента сплава.

Плотность потока массы i -го легирующего элемента на стенке парогазового канала определяется алгебраической суммой плотностей потоков, обусловленных испарением (J_{ev}) и конденсацией (J_c)

$$J = J_{ev} + J_c. \quad (5)$$

Система дифференциальных уравнений замыкается краевыми условиями, включающими начальное распределение температуры и концентрации примесей $T(t=0) = T_0$, $S(t=0) = S_0$, и граничными условиями. На входной границе задано постоянное значение концентрации и температуры $S(x=0; y) = S_0$ и $T(x=0; y) = T_{\Pi}$. На выходной границе – условия постоянства плотности теплового потока и плотности потока массы. Боковая граница 2 и ось симметрии ($y=0$) являются адиабатическими и закрытыми, на них заданы

нулевые значения плотности теплового потока и плотности потока массы, соответственно. Поверхность парогазового канала (граница 5) принята изотермической с заданной плотностью потока массы.

Данные расчеты проводились для алюминиевого сплава АМг 6 и были получены кривые распределения эффективной концентрации Mg в сварном шве (рис. 2).

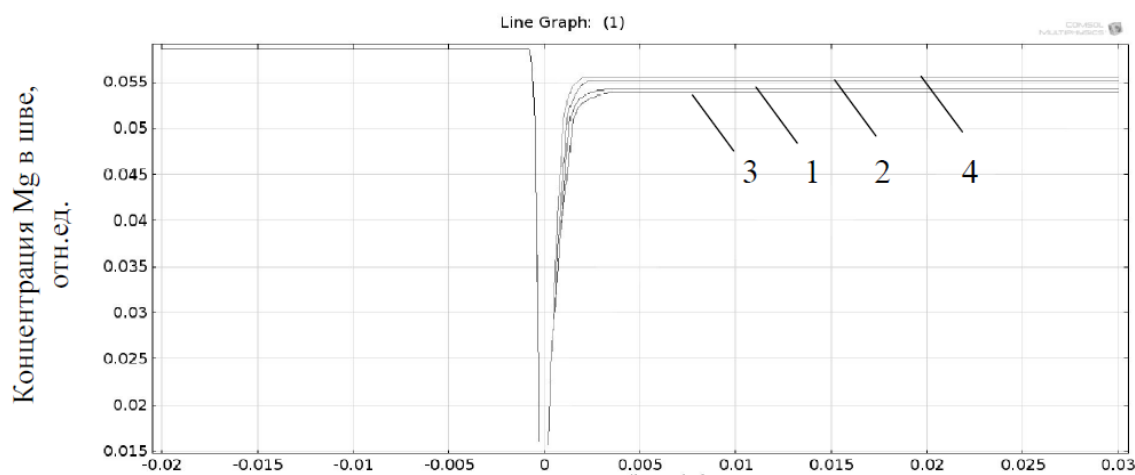


Рис. 2. Расчетные значения изменения концентрации Mg вдоль стыка сварного прохода для сплава АМг-6, для поперечной осцилляции, 1, 2, 3, 4 – режимы с различной скоростью сварки 5, 6, 8, 10 мм/с

Далее был проведен эксперимент по матрице планирования и при помощи рентгенофлуоресцентного анализа определялся химический состав по глубине сварочных проходов. На рис. 3 показаны примеры макроструктуры сварочных проходов, которые были выполнены при токе луча 40 мА, скорости сварки 10 мм/с и с различной осцилляцией ЭЛ и без нее.

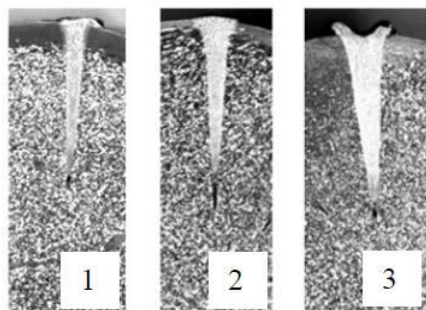


Рис. 3. Макроструктура сварных проходов, выполненных: 1 – статическим лучом, 2 – с продольной осцилляцией, 3 – с поперечной осцилляцией

При анализе полученных данных было установлено, что при ЭЛС статическим ЭЛ наблюдается истощение Mg в пределах 7 % от первоначального содержания в сплаве, для ЭЛС с осцилляцией ЭЛ составляет

примерно 10 %, причем траектория перемещения электронного луча (продольная и поперечная) не влияет на интенсивность обеднения Mg.

На основании полученных данных построена регрессионная зависимость концентрации Mg в швах при ЭЛС с различными видами осцилляции ЭЛ и изменением параметров режимов сварки.

Регрессионное уравнение для определения содержания Mg при ЭЛС с осцилляцией ЭЛ имеет вид:

$$SMg = 5,412 + 0,067 \cdot V_{св} - 1,129 \cdot I_{л} \cdot V_{св} - 32,355 \cdot I_{л} \cdot A + 2,164 \cdot A^2.$$

По полученным регрессионным уравнениям зависимости концентрации Mg от параметров режимов сварки были построены графики, приведенные на рис. 4.

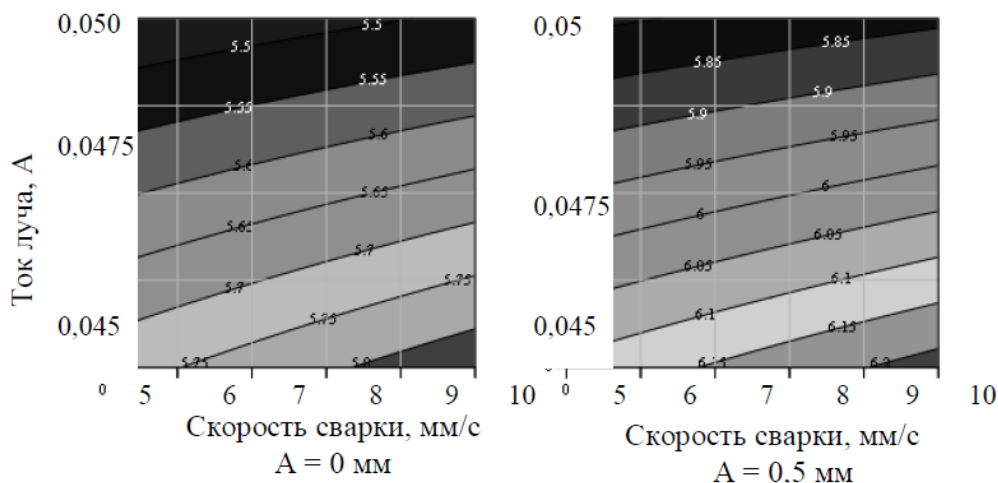


Рис. 4. Зависимость концентрации магния от изменения скорости сварки и амплитуды осцилляции при фиксированном значении тока луча для сварных соединений сплава Амг-6, выполненных с поперечной осцилляцией электронного луча

Из полученных зависимостей концентрации магния по глубине сварного шва следует, что в верхней части сварного шва происходит истощение магнием в большей степени, чем в средней и корневой части. Также, на изменение концентрации влияет тока луча и скорость сварки.

Сравнение расчетных концентраций магния и полученных в ходе экспериментов показало, что погрешность расчетов не превышает 4–6 %.